

審査の結果の要旨

氏名 橋本 資教

本論文は、線形イオントラップに捕獲された複数種類の同位体イオンに対して、ある同位体のみをレーザ冷却することで得られる蛍光を測定するために必要となる装置開発を行うとともに、トラップされたイオンの挙動に関する研究を行っており、7章より構成されている。

第1章は、序論として、本研究の背景とその目的について述べられている。レーザ技術の進展に伴い単一原子の観測が可能になってきており、それに関連した分析技術が概観されている。本研究も応用的な観点では、微量同位体分析を見据えたものであることが触れられているが、そのために必要となるトラップされた複数種の同位体の制御技術と観測技術に関する知見を深める必要があることが述べられている。それらを踏まえて、本研究では単一イオンおよび同位体の制御可能な実験装置の構築とそれを利用した複数種の同位体の観測を行い、その挙動を明らかにすることを目的としていることが述べられている。

第2章は、理論・原理が述べられている。まず、本研究で取り扱っているカルシウムが紹介された後に、線形イオントラップの原理およびそこにトラップされたイオンの挙動に関する理論的背景が説明されている。次にレーザ冷却、それにより観測可能となる量子跳躍について紹介されている。さらに同位体を扱う上で必要となる同位体シフトおよび超微細構造に関する説明があり、その影響が記述されている。

第3章では、単一イオンおよび同位体イオンを観測するために必要となる実験装置システムの構築に関して記述されている。まず、基本的な実験装置（真空装置、レーザ装置、観測光学系）の概要を説明している。それらを踏まえて、Caイオンのレーザ冷却を行って、非対称な蛍光信号を観測し、イオンが冷却されていることを確認している。さらに、階段状の離散的なイオン蛍光を観測し、イオンの個数変化に応じた蛍光観測を実現し、単一イオン観測を実現している。また850nmレーザ光を用いることでイオンの状態を量子跳躍させることで能動的にイオン数の観測を行い、1および2個のイオンが捕獲された状態での蛍光観測に成功している。また397nmのレーザ光波長を掃引することで、Ca-44やCa-48に応じたイオン蛍光信号を観測している。これらの結果から、本研究で構築した実験装置により単一イオンおよび同位体イオンを区別した取り扱いを実現している。

第4章ではイオントラップを用いた質量選別をイオンの同位体シフトを利用して蛍光観測した結果を示している。まず、四重極電極に印加されるrf電圧およびdc電圧がトラ

ップされたイオンに与える影響を議論している。単一イオン挙動を記述するマシュー方程式では r f 電圧は q 、d c 電圧は a のパラメータにそれぞれ対応している。これらは質量電荷比に依存していることから、同位体毎に異なる値となるため、これを利用して質量選別を行う方法が検討されている。それらを実験的に明らかにするため、各電圧を変化させつつ、各同位体の蛍光を観測している。その結果、非線形共鳴に対応して、各同位体イオンが運動していることを明らかにしている。またそれを利用して質量のハイパスフィルター、ローパスフィルターを実現し、所望の同位体をトラップに残す手順を実験的に明らかにしている。

第5章では、超微細構造をもつ Ca-43 イオンの冷却に必要なレーザシステムの構築とその観測について述べている。複数の周波数を準備するために、追加のレーザシステムに加えて、電気光学素子、音響光学素子を用いている。また磁気副準位への落ち込みを避けるため、イオンに磁場を与えるためのコイルの設置を新たに行っている。新たに追加したこれらの装置の評価を行い、隣接同位体である Ca-44 による協同冷却も用いて、 Ca-43 イオンの超微細構造に応じた蛍光信号を観測することに成功している。

第6章では、レーザ光共鳴イオン化による同位体選択的なイオン捕獲を行っている。これまで本研究はレーザアブレーションにより発生するイオンをそのままトラップしていたため、同位体選択性がなかった。レーザ光共鳴イオン化を用いることで、イオン生成時に同位体選択性を持たせることで、所望の同位体のみをトラップすることが可能になる。そこで、原子発生源として、レーザアブレーション、抵抗加熱オープンを利用して、光共鳴イオン化実験を行っている。中性原子の共鳴励起波長 423 nm に応じて異なる同位体の励起イオン化を確認し、同位体選択的にイオンをトラップすることに成功している。

第7章は結論であり、本研究のまとめが述べられている。

以上を要するに、本論文はイオントラップとレーザ冷却を用いて、同位体を取り扱うための装置開発を行うとともに、それを用いてトラップされた複数の同位体の挙動を明らかにしている。こうした成果はシステム量子工学の進歩に貢献することが少なくない。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。